

스테인드글라스 렌더링을 위한 조명 모델

김정아, 명세화, 김동호

송실대학교 미디어학과 Magic Lab.
{leo0621, mingshuhua, dkim}@ssu.ac.kr

An Illumination Model for Stained Glass Rendering

Jung-A Kim, Shihua Ming, Dongho Kim
Magic Lab, Dept. Media, Soongsil University

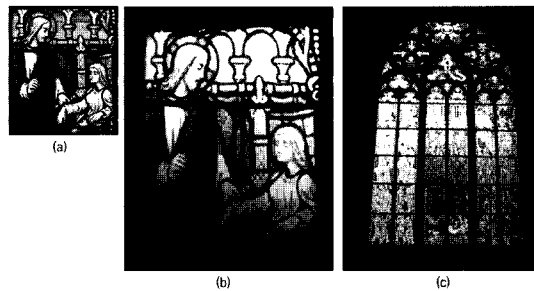


그림 1 : (a)맵소스 (b)그림 (a)의 맵소스를 이용하여 본 논문의 조명모델을 사용한 결과 이미지
(c)실제 스테인드글라스 이미지

요약

본 연구에서는 스테인드글라스 렌더링을 위한 조명 모델을 제안한다. 본 기법은 스테인드글라스에서 중요시되는 광학적 요소를 렌더링 알고리즘에 반영하여 보다 사실적인 스테인드글라스 결과 영상을 만들어 낸다. 이를 위해 3단계의 작업을 수행하게 되는데 먼저 스테인드글라스의 표면과 빛의 방향에 의해서 영향을 받게 되는 확산광과 빛과 시선의 각도에 따라 달라지는 하이라이트를 계산한다. 그 다음으로 프레넬 향을 이용하여 스테인드글라스에 투과된 빛의 양을 계산한다. 그 후, 각 유리조각의 색상에 따른 빛의 흡수를 표현하여 사실적인 스테인드글라스 영상을 만든다.

Abstract

In this paper we present an illumination model for rendering realistic stained glass. This techniques simulates the phenomenon of stained glass in real world by applying important optical component of the stained glass to the rendering algorithm. The optics for stained glass involves three basic physical mechanisms. First, diffuse light and highlight contribute to the brightness of stained glass which is typically white and changes along with the light source and the view position. Next, Fresnel refraction dominates the amount of refracted (transmitted) light. Finally, we express volume absorption occurs in all stained glass. Then, the rendered stained glass images achieve excellent realism.

키워드 : 스테인드글라스, 확산광, 하이라이트, 프레넬, 빛 흡수

Keywords : stained glass, diffuse light, highlight, Fresnel refraction, light absorption

1. 서론

최근 컴퓨터 그래픽스 분야에서 이전까지 많이 연구되지 않았던 스테인드글라스에 관한 연구가 조금씩 이루어지고 있지만 지금까지 스테인드글라스에 관한 연구는 비사실적 렌더링 기법에 관한 연구가 대부분이었다.

그러나 현실에서 스테인드글라스는 빛이 투과되어 나타나는 색과 빛의 결합적인 현상들이 미적가치가 있는 것임에도 불구하고 스테인드글라스의 내용을 구성하는 방향의 연구가 주류를 이루었고 실제 환경에서 특히, 빛이 비춰졌을 때의 사실적인 렌더링 방법에 대한 연구는 아직까지도 많이 이루어지지 않았다.

스테인드글라스는 색유리 조각의 모음으로 그림을 표현하는 양식을 지칭한다. 스테인드글라스는 로마네스크 시대에 교회 건축 창에 도입된 종교 미술로서 시작되었고, 20세기 이후에는 회화 양식과 결합되어 그 영역과 양식이 다양화하기 시작하면서 현대 조형 예술의 일부가 되었다. 즉, 스테인드글라스는 유리를 매체로 하여 빛과 색을 종합시킨 예술이다.

일반적으로 판이나 캔버스 등의 고체에 그려진 그림이 빛의 반사를 통해 색을 표현하는 경우와는 달리, 스테인드글라스는 유리의 분자구조를 통해 빛 에너지를 직접 투과하여 표현하기 때문에 판유리가 완전히 평평하다면 광선은 굴절됨이 없이 입사각과 같은 각도로 투과하게 된다. 그러나 두께가 다르거나 유리 속에 기포나 작은 흠 등이 광선을 굴절시켜 빛을 수렴하거나 확산시키는 등의 여러 변화를 통해 다양한 빛의 효과가 생기게 된다. 이런 이유 때문에 스테인드글라스는 유리의 공정단계에서 의도적으로 불완전 공정을 사용해 제작되기도 한다.

이러한 방법으로 제작된 스테인드글라스는 빛의 위치나 밝기 등의 조명의 환경에 따라 항상 다른 효과가 나온다. 예를 들면 스테인드글라스를 보는 관객은 스테인드글라스를 오전에 관람하느냐, 오후에 관람하느냐에 따라 다르게 나타나는 빛의 효과를 볼 수 있을 것이다. 또한 그림 2처럼 스테인드글라스를 보는 위치에 따라서 다르게 나타나는 빛의 효과를 볼 수 있을 것이다.

위의 요소들로 볼 때 스테인드글라스에서 광학적 요소가 굉장히 중요한 비중을 차지하고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 스테인드글라스는 일반적인 물체와는 다른 조명모델이 필요하다. 그리하여 본 연구에서는 좀 더 사실



그림 2 : 프라하 비트성당의 스테인드글라스

적인 렌더링을 위하여 스테인드글라스 렌더링에서 광학적 요소를 고려하였다. 이번 연구는 주로 스테인드글라스가 실제 빛의 방향이나 빛의 세기등과 같은 광학적 요소에 의해 다르게 보여지는 실내에서의 스테인드글라스 영상 렌더링에 초점을 둔다.

본 논문에서는 이러한 광학적 요소를 표현하기 위해 그림 3와 같이 3단계로 광학적 요소를 모델링한다.

첫 단계에서는 스테인드글라스의 표면과 빛의 방향에 의해서 영향을 받게 되는 확산광과 빛과 시선의 각도에 따라 달라지는 하이라이트를 계산하여 스테인드글라스에 도달하는 전체 빛의 양을 구한다. 그리고 두 번째 단계에서는 프레넬 함수를 이용하여 스테인드글라스에 투과된 빛의 양을 계산한다. 그리고 마지막 단계에서 각 유리조각의 색상에 따른 빛의 흡수를 표현하여 사실적인 스테인드글라스 영상을 만들어 내었다.

2. 관련연구

스테인드글라스는 교회건축의 일부로 벽에 유리 조각을 붙여 장식을 하는 유리 텍세라를 기원으로 한다. 그 후 색유리가 교회 건축 창에 응용되어 오늘날의 스테인드글라스 양식을 갖추게 되었다(그림 2). 이렇게 스테인드글라스가 교회나 성당의 건축에 사용된 것은 스

테인드글라스의 조명효과가 엄숙하면서도 신비로운 느낌을 주기 때문이다. 현재에 이르러선 유리 제작의 기술의 발전으로 다양한 유리공정과정에 따라 서로 다른 빛의 효과를 만들어내기도 한다.

기존의 스테인드글라스 관련된 연구로는 비사실적 렌더링 기법을 사용하여 스테인드글라스를 모델링하는 연구들을 들 수 있다[1,2,3]. 이 연구들에서는 주로 두 가지의 주요 단계를 거쳐 스테인드글라스 영상을 만드는 데, 첫째로는 스테인드글라스 영상의 바탕을 이루는 윤곽선을 만들어내는 과정, 그 다음으로는 결정된 타일에 색을 입히는 과정이다. 그러나 위의 연구들은 대부분 비사실적 렌더링 분야의 연구가 주류를 이루었고 스테인드글라스를 표현하는데 있어 광학적인 요소들은 배제되어 있다. 그러므로 사실적인 스테인드글라스를 표현하는 것과는 별도로 기존의 영상을 스테인드글라스로 변환하는 연구가 주류를 이루었다.

Sun[4]등은 다이아몬드를 렌더링하기 위해 광학적 요소를 어떻게 계산하여 렌더링 해야 하는지에 관한 연구로 프레넬 함수를 이용하여 반사와 굴절을 계산하고 자신들의 이전 논문[5]의 내용을 기반으로 빛의 흡수를 계산하여 다이아몬드를 렌더링하였다. 유리와 비슷한 제질적특성을 가진 다이아몬드의 광학적 계산을 위해 프레넬을 이용한 것을 본 연구에서도 응용하여 사용하였다. 여기에 추가적으로 스테인드글라스는 컬러를 가지고 있는 유리로서 각각의 컬러마다 빛을 흡수하는 양이 달라지기에 그러한 색유리의 특성이 가미된 광학적 모델이 필요하다.

3. 알고리즘

스테인드글라스는 대부분 실내의 채광의 효과를 위해서 만들어지므로 사용자는 대부분 빛이 들어오는 면에서 스테인드글라스를 보는 것이 아니라 스테인드글라스를 투과한 빛을 보게 된다(그림 4). 이러한 빛은 조명 조건에 따라 그 방향과 세기가 달라진다. 그러므로 스테인드글라스를 통해 들어오는 빛의 양은 빛의 방향, 빛과 스테인드글라스와의 거리 등에 따라서 달라진다. 우리가 렌더링 하고자 하는 면은 실내에서 보여지는 스테인드글라스의 모습이므로 다음과 같은 3단계의 알고리즘으로 계산하였다(그림 3).

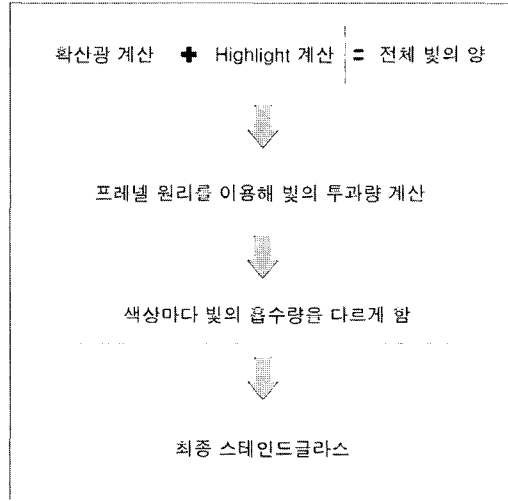


그림 3 : 스테인드글라스 렌더링을 위한 알고리즘

첫 번째 단계에서는 스테인드글라스의 표면과 빛의 방향에 의해서 영향을 받게 되는 확산광과 빛과 시선의 각도에 따라 달라지는 하이라이트를 계산하여 스테인드글라스에 도달하는 빛의 양을 계산하고 다음 단계에선 프레넬 함수를 이용하여 투과된 빛의 양을 계산한다. 마지막 단계에서는 각 컬러별 흡수되는 빛의 양을 계산하는 방법으로 다음과 같은 알고리즘을 통해 계산한다.

3.1. 확산광과 하이라이트의 계산

스테인드글라스를 투과한 빛은 광원의 위치에 따라서 각각의 방향을 가지고 있다. 스테인드글라스에 입사하는 빛은 그림 3과 같이 스테인드글라스 표면의 법선 벡터와 광원 벡터가 이루는 그 입사 각 θ_i 에 따라 도달하는 빛의 양이 다르게 나타난다. 이는 컴퓨터 그래픽스에서 사용하는 일반적인 조명 모델에서 확산광(diffuse) 성분과 같다고 할 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 우리는 아래의 식을 통하여 확산광을 계산할 수 있다.

$$C_a = C_g (L \cdot M) \quad (\text{식 1})$$

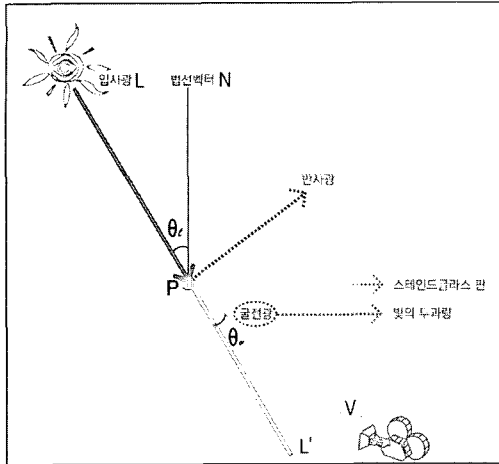


그림 4 : 빛의 방향과 시선의 방향이 이루는 각도에 따라 달라지는 빛의 세기

즉, 확산광 C_d 는 광원 벡터 L 과 스테인드글라스 표면의 법선 벡터 N 의 내적과 스테인드글라스의 컬러 C_g 의 값을 통해 구할 수 있다.

또한 스테인드글라스에 입사하는 빛의 세기는 일정한 값이 아니라, 빛과 시선이 이루는 방향 θ_v 에 따라 다르다. 즉, 그림 3에서 알 수 있듯이 θ_v 의 값이 180° 에 가까울수록 스테인드글라스를 투과해서 보여지는 표면의 빛의 양이 많고 θ_v 의 값이 0° 에 가까울수록 스테인드글라스를 투과해서 보여지는 표면의 빛의 양이 적어진다. 그러므로 스테인드글라스 표면의 한 점 P의 빛의 세기를 표현할 때의 식은 다음과 같다.

$$C_h = C_g (V \cdot L')^n \quad (\text{식 2})$$

즉, 하이라이트 값은 시선 벡터 V 와 스테인드 글라스를 투과한 빛 L' 의 내적을 통해 구할 수 있는데 여기서 V 와 L' 의 내적은 $\cos\theta$ 를 이용해 구할 수 있다. 빛이 유리를 통과할 때 굴절이 일어나지만 유리를 벗어나면서 다시 원래의 방향을 회복하므로 L' 은 입사광 방향 L 과 같게 된다.

그리고 계수 n 은 하이라이트의 크기를 조절하는 역할을 한다.

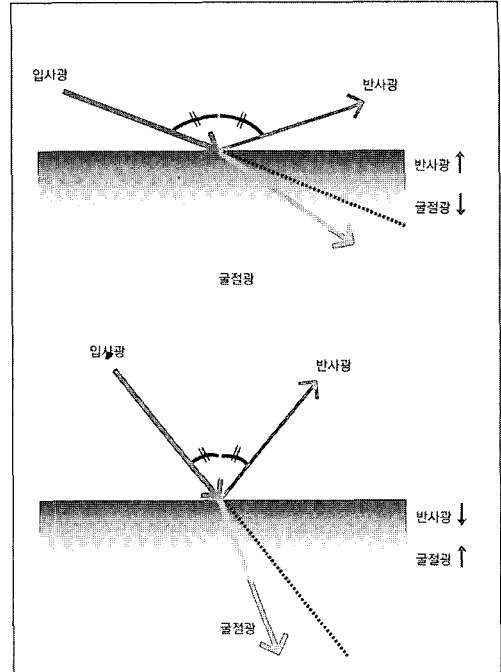


그림 5 : 프레넬 원리

스테인드글라스에 도달하는 전체 빛의 양 C_l 은 확산광 C_d 와 하이라이트 값 C_h 를 합하여 계산할 수 있다.

3.2. 빛의 투과량 계산

일반적으로 빛이 두 매질의 경계면에 도달할 때, 일부 빛들은 경계면에서 반사하고 나머지는 표면을 통과하여 굴절하는데 이러한 현상을 프레넬 효과라고 한다. 프레넬 계수는 물리적으로 빛의 반사와 굴절을 계산하는 방법으로 얼마나 많은 빛이 반사되고 얼마나 많은 빛이 굴절(투과)되는지를 알려준다(그림 5).

본 연구에서는 스테인드글라스를 통해 들어오는 빛이 투과되는 양을 계산하여 렌더링 해야 하기 때문에 프레넬 함수를 통하여 빛의 투과량을 계산한다.

프레넬 계수는 다음과 같이 구한다.

$$F_\lambda = \frac{1}{2}(F_p + F_s) \quad (\text{식 3})$$

여기서 F_p 와 F_s 는 다음 식들과 같다.

$$F_p = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (\text{식 4})$$

$$F_s = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (\text{식 5})$$

여기서 p 는 평면과 평행인 편광 성분이고 s 는 평면과 수직인 편광 성분이다. 그리고 θ_1 은 입사각이고 θ_2 는 투과각으로 스넬의 법칙을 통해 얻게 되는 값이다. 이 식을 통하여 평면으로부터 수직, 수평인 편광 성분의 반사된 빛의 양의 비율인 F_p 와 F_s 를 각각 구하는데, 이들의 평균값을 프레넬 계수 F 로 한다[6,7,8].

이렇게 구한 프레넬 계수 F 는 입사된 빛의 얼마만큼의 비율의 빛이 반사하는 지에 대한 값이므로, 스테인드글라스를 투과하는 빛의 양은 $(1-F)$ 비율이다. 그리하여 스테인드글라스를 투과하여 굴절된 빛의 양 C_r 는 C_i 과 프레넬 계수를 통해 다음과 같이 구한다.

$$C_r = (1-F) \cdot C_i \quad (\text{식 6})$$

3.3. 유리의 컬러별 빛의 흡수

스테인드글라스를 각각의 유리 조각이 색을 가지고 있는 색유리의 형태로 컬러에 따라 빛의 흡수량이 다르다. 특히 검정색 에지(Edge) 부분은 유리가 아닌 납들이기 때문에 빛은 투과하지 않는다. 그러므로 스테인드글라스에서 컬러에 따른 빛 흡수는 빛이 스테인드글라스를 투과될 때 실제 스테인드글라스와 같이 렌더링하는데 중요한 작용을 한다.

이러한 작용을 Evans[9]에서는 Bouguer-Lambertian 법칙을 이용하여 계산하였다. Bouguer-Lambertian 법칙에 의하면 빛이 한 매질에서 다른 투명한 매질로 들어갈 때 빛의 투과율은 다음과 같은 공식으로 표시된다.

$$T_{internal}(\lambda, l) = 10^{-a(\lambda)l}, \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{식 7})$$

여기서 $a(\lambda)$ 는 물질이 가진 고유한 흡광도를 표시하고

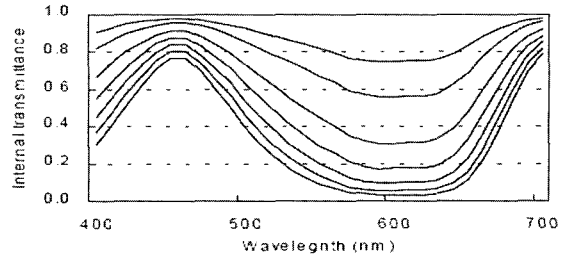


그림 6 : light blue glass의 빛의 투과율

l 는 빛의 통과 거리를 표시한다. Bouguer-Lambertian 법칙에 의하면 l 이 증가함에 따라 빛의 채도가 변할 뿐만 아니라 빛의 색상(hue)도 변화시킨다[9].

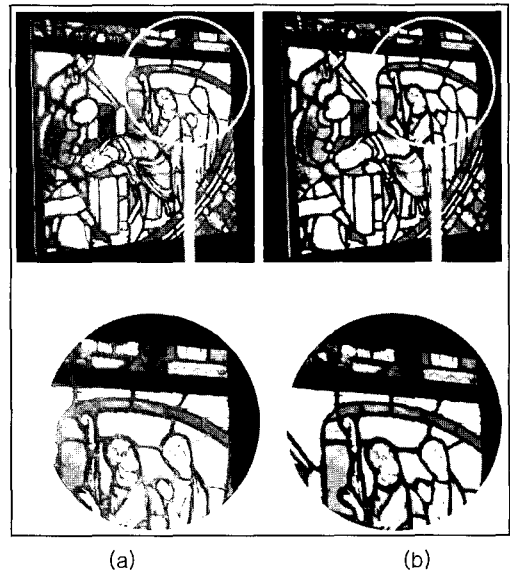


그림 7 : (a) 컬러별 빛의 흡수를 적용하지 않은 결과
(b) 컬러별 빛의 흡수를 적용한 결과

이러한 관계는 Sun[2]를 통해 알 수 있다. 그림 6를 보면 l 이 1,2,4,6,8,10,12 밀리미터일 때 light blue glass의 빛의 투과율을 스펙트럼곡선으로 표시한 것이다. 즉, 이렇게 계산한 Bouguer-Lambertian 법칙을 통해 얻은 $T_{internal}$ 값을 이용하여 유리의 컬러별 투과율을 얻을 수 있다.

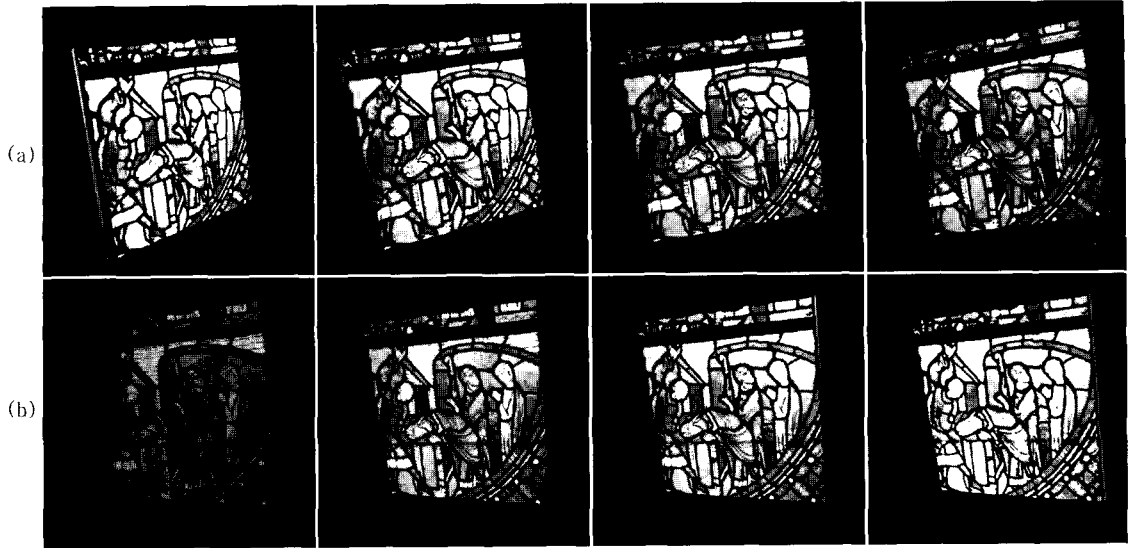


그림 8 : (a): 시선의 방향에 따른 렌더링 결과
(b): 광원의 방향에 따른 렌더링 결과

$$C_{final} = C_r * T_{internal} \quad (\text{식 } 8)$$

식 8에서는 이전 단계에서 계산한 스테인드글라스를 투과한 빛의 양 C_r 에 컬러별 투과율 $T_{internal}$ 을 적용하여 최종 스테인드글라스의 색상 C_{final} 을 계산하였다. 이렇게 계산한 결과 그림 7과 같이 스테인드글라스의 유리의 색상에 따라 다르게 투과하여 들어오는 빛의 양을 렌더링 하는 결과를 얻을 수 있었다. 그림 7에서 빛의 투과량이 적은 파랑색이나 빨강색의 경우 이전의 두 단계까지만 계산한 (a)는 다른 컬러와 같은 빛의 투과량으로 인하여 본래의 컬러 값을 많이 손실한 반면 컬러별 투과율까지 적용한 (b)는 파랑색이나 빨강색의 빛의 투과량이 다른 컬러보다 적게 계산되어 실제 스테인드글라스 영상에 가까운 결과를 얻을 수 있었다. 또한 스테인드글라스에서 유리조각을 끼우는 역할을 하는 검정색 에지(Edge)부분은 유리가 아닌 납틀이기 때문에 빛이 전혀 투과 할 수 없다. 그래서 본 연구에서 검정색 에지(Edge)부분은 알파 텍스처를 이용하여 빛이

투과할 수 없게 만들었다. 그리하여 이전의 두 단계까지만 계산한 (a)보다 컬러별 투과율까지 적용한 (b)의 결과가 실제의 스테인드글라스 영상에 가까운 것을 알 수 있다.

최종적으로 식1,2,6,8에 의하여 아래와 같은 조명 모델을 만들게 되었다.

$$C_{final} = (C_d + C_h) \cdot (1 - F) \cdot T_{internal} \quad (\text{식 } 9)$$

4. 실험결과

본 논문은 3장에서 설명한 알고리즘을 HLSL의 픽셀 셰이더를 사용하여 구현하였으며 그림 7은 렌더링 결과를 보여준다. 픽셀 셰이더를 이용하여 각 픽셀마다 빛의 방향과 시선이 이루는 각도를 계산하여 픽셀마다 다르게 표현되는 빛을 렌더링하였다. 그리고 컬러에 따른 빛의 흡수를 표현하기 위해 알고리즘의 2단계까지 계산하여 나온 컬러에 $T_{internal}$ 값을 적용하여 최종의 컬러를 표현하였다.

그림 8에서의 (a)의 결과에서 알 수 있듯이 빛과 시선

이 이루는 각도에 따라 빛의 양이 다르게 표현되는 결과를 만들어 내었다. 또한 (b)의 결과와 같이 빛과 스테인드글라스와의 각도로 인해 다르게 나타나는 빛을 렌더링 하는 결과를 만들어 내었다. 또한 컬러별로 빛의 투과율을 다르게 하여 사실적인 스테인드글라스 렌더링 결과를 만들어 내었다. 즉, 이번 연구의 결과를 통해 우리는 실제 스테인드글라스의 물리적인 현상들을 거의 사실과 같게 렌더링 할 수 있었고, 이러한 결과는 스테인드글라스를 실제 게임이나 인터랙티브 아트 등이 적용시켰을 때 시간이나 날씨 등에 따라 다르게 표현되는 스테인드글라스의 영상을 얻을 수 있게 될 것이다.

본 논문에서 사용한 시스템은 펜티엄4 3GHz, 1GB RAM, nVIDIA GeForce 6800이며, 실험한 결과는 초당 930프레임 이상의 렌더링 속도가 나왔다.

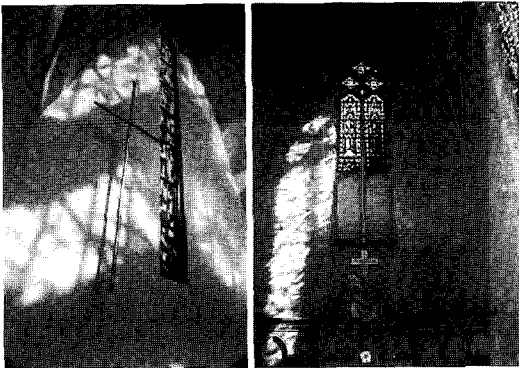


그림 9 : 실제 스테인드글라스를 통해 들어오는 코스틱 효과

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 실제 스테인드글라스처럼 렌더링 하기 위해 가능한 스테인드글라스의 물리적인 현상을 모델링 하여 최종 결과를 만들어 내었다. 즉, 실제 스테인드글라스에서의 물리적 현상으로 광학적 요소가 중요한 비중을 차지하고 있기 때문에 스테인드글라스 렌더링에서 광학적 요소를 반영하여 다양한 조명 조건에 따라 변화할 수 있는 스테인드글라스 렌더링을 위한 조명 모델을 제안하였다.

향후 연구로는 첫째, 사용자들이 빛의 방향, 거리 등을 조정할 수 있는 인터페이스를 제공하여서 개개인이 취

하게 되는 시각의 자발적인 선택을 할 수 있게 하는 것이다. 둘째 현재의 알고리즘을 스테인드글라스의 NPR 분야에 적용하여 기존 스테인드글라스 NPR 분야의 결과보다 더 사실적인 스테인드글라스 영상을 제작할 것이다. 또한 다양한 유리의 가공기법에 따라 달라지는 표면의 요철이나, 매질, 내부의 기포 등에 의해 발생하는 빛의 현상까지 표현하는 스테인드글라스 영상을 제작할 것이다. 마지막으로 그림 9와 같이 스테인드글라스로 인해서 생기는 코스틱 효과(Caustic effect)를 표현하는 것이다.

이것을 구현하여 게임이나 애니메이션 등에서 스테인드글라스를 좀 더 사실적으로 표현하여 적용 가능하게 할 것이다.

참고문헌

- [1] MOULD, D. "A Stained Glass Image Filter." In *Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering, ACM International Conference Proceeding Series*, 20-25, 2003.
- [2] Stephen Brooks. "Image-Based Stained Glass." In *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics(TVCG)*, vol. 12, no. 6, 1547-1558, 2006.
- [3] 나현철, 윤경현. "Watershed를 이용한 스테인드글라스 렌더링." *한국컴퓨터그래픽스학회 춘계학술대회 논문집*, 31-36, 2005.
- [4] Sun, Y., Fracchia, F.D., and Drew, M.S. "Rendering diamonds." In *Proceedings of the 11th Western Computer Graphics Symposium (WCGS)*, 9-15, 2000.
- [5] Sun, Y., Fracchia, F.D., and Drew, M.S., "Rendering the Phenomena of Volume Absorption in Homogeneous Transparent Materials," In *2nd Annual IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging (CGIM'99)*, Oct. 1999. pp. 283-288, 1999.
- [6] Mark DeLoura. "Game Programming Gems", Charles River Media. 2000.
- [7] Max Born and Emil Wolf, "Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light," Pergamon Press, Oxford. 1975.

- [8] Fernando, Randima., Kilgard, Mark J. "The CG Tutorial: The Definitive Guide to Programmable Real-Time Graphics", Addison-Wesley Professional 2003
- [9] Ralph M. Evans, "An Introduction to Color", *John Wiley & Sons, New York*, 1961.